**TEMA:** Pérdidas primarias de energía

**RESUMEN TEÓRICO**

**1. En régimen laminar**

Cuando un fluido circula a través de una tubería, su contenido total de energía va disminuyendo paulatinamente, debido a la intervención de las tensiones de corte provocadas por la viscosidad del fluido. Esta pérdida de energía recibe el nombre de **pérdida primaria**, se registra sólo en los tramos rectos de la tubería y tiene gran importancia en el comportamiento energético del fluido. La magnitud de las pérdidas en una tubería dada es bastante diferente si el flujo es laminar o es turbulento, por lo que es indispensable conocer previamente qué tipo de flujo se presenta en cada caso.

El cálculo de las pérdidas se puede efectuar utilizando la ecuación de Darcy-Weisbach, que establece:

hL = (f L v2) / (2 g D)

hL = pérdida primaria de energía, (m)

f = factor de fricción

L = longitud de la tubería, (m)

v = velocidad promedio en la sección transversal del conducto, (m/s)

g = aceleración de la gravedad, 9.81 (m/s2)

D = diámetro de la tubería, (m)

Cuando el flujo es laminar el factor de fricción se calcula con la expresión:

f= 64/Re

El Reynolds (Re) determina la región de flujo, es decir, qué características tiene esa transferencia de cantidad de movimiento interno del fluido. Así, en régimen laminar (Re < 2000 para flujo interno en tuberías circulares) la transferencia se da por capas, el movimiento es lento pero ordenado; aunque también la velocidad puede ser alta pero con fluidos muy viscosos. Por otra parte, para Reynolds superiores a 4000, el régimen se considera turbulento, indicando un desorden en el proceso de transferencia de cantidad de movimiento interno del fluido, pero también mayor velocidad y un perfil de velocidades radial más llano, a diferencia del laminar que tiene a ser parabólico. Esto se demuestra con el experimento de Reynolds. Entonces, el número de Reynolds, agrupa esas variables de flujo que determinan el régimen de transferencia. Y se calcula así:

De tal forma que si el Re < 2000 (régimen laminar), se pueden calcular entonces las hL así:

hL = (32 ν L v) / (g D2)

**2. En régimen turbulento**

Cuando el flujo es turbulento (Re > 4000) el factor de fricción se calcula utilizando el Diagrama de Moody, conociendo los valores de Número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería. (f = función (Re, k))

El factor de fricción depende del Reynolds y del factor de rugosidad en régimen turbulento, pero si se aumenta demasiado la velocidad, haciendo que el régimen sea completamente turbulento, donde ya no influye la viscosidad misma del fluido, se puede decir que el f depende solo del factor de rugosidad, k. (f = función(k))

El ***f*** también se puede calcular, pero ocurre algo con las ecuaciones: Si se requiere precisión, el rango de aplicabilidad (Reynolds y rugosidades) disminuye. Algunas tienen un equilibrio: relativamente buena precisión y rango amplio de aplicabilidad. También ocurre que la mayoría de ecuaciones son del tipo implícitas. Esto exige iterar, partiendo de un ***f*** supuesto, evaluando Reynolds y volviendo a calcular ***f***, hasta que coincida el valor anterior con el presente. Afortunadamente hay una ecuación que es explícita (no iterativa) y que maneja una buena precisión y un rango amplio. Esta es la ecuación de **Swamme y Jain**:

Donde.

Esta **k**, es el “Factor de rugosidad” o “rugosidad relativa”. Significa que un tubo nunca es perfectamente liso, sino que tiene sus rugosidades propias del material y del proceso de maquinado. Y que una misma rugosidad afecta de distinta manera si el diámetro del tubo es pequeño (afecta más) o si el diámetro del tubo es grande (afecta menos).

Analizando la ecuación, teniendo en cuenta que el denominador está precedido de un logaritmo, se puede desprender que:

* A mayor Reynolds menor *f*.
* A mayor **k**, menor *f*.

**A continuación se mostrarán ejercicios de cálculo de pérdidas en régimen laminar y turbulento. En este último, se abordará desde el diagrama de Moody y desde la ecuación de Swamme para que se vean las diferencias que hay en cada caso.**

**Ejercicios resueltos de ecuación general de energía**

1. Por una tubería nueva de acero cédula 80, diámetro 1 pulgada, fluye petróleo crudo 60 m verticalmente hacia abajo, a 0,64 m/s. El petróleo tiene una densidad relativa de 0,86 y una viscosidad dinámica de 1,2x10-2 Pa\*s. Calcule la diferencia de presión entre las partes superior e inferior de la tubería.

**Solución**:

Hay algo que debe quedar claro de una vez por todas: la velocidad no cambia si el diámetro de la tubería no cambia. (Por ecuación de continuidad). La ecuación de energía quedaría así, entre A (arriba) y B (abajo):

Se conocen las alturas, pero no las pérdidas. Entonces hay que calcular las pérdidas primero, para luego reemplazar en la ecuación de energía y ahí si calcular la diferencia de presiones. (Ojo: la “diferencia”, es decir la “resta”. No las presiones individuales).

Entonces, para las pérdidas hay que saber si son en régimen laminar o turbulento. Y eso se hace con el Reynolds:

El diámetro se obtuvo del apéndice F2 del Mott. Tubería de acero cédula 80.

Recordando que Pa = N/m2=kg m s-2 m-2 = kg m-1 s-2, entonces, el Reynolds queda:

Como Re<2000, el régimen de flujo es Laminar. Entonces,

Y las pérdidas de energía por fricción del petróleo con la tubería, serían:

hL = (f L v2) / (2 g D) =

Ahora sí se calcula la diferencia de presiones:

Entonces,

**Respuesta**: (Y análisis)

La diferencia de presiones entre la parte superior y la parte inferior de la tubería del problema es -481,2 kPa. Lo cual quiere decir que el crudo ha ganado presión por el descenso de altura (a velocidad constante). Si las pérdidas aumentan, esa ganancia de presión disminuye, es decir disminuye la diferencia de presión, se hace menos negativa o más positiva.

1. Un ducto que transporta un determinado líquido (G = 0,93) a 2000 L/min está hecho de tubería de acero de 6 pulgadas cédula 80. Las estaciones de bombeo están espaciadas a 30 m entre sí. Si el líquido tiene una viscosidad absoluta de 0,025 Pa\*s, calcule: (a) Caída de presión entre las estaciones; (b) Potencia que debe suministrar la bomba para que la presión no caiga en la entrada de cada bomba.

SOLUCIÓN:

(a). Primero se determina el Reynolds, con la velocidad que se halla mediante el caudal en m3/s divido en el área de flujo de la tubería que se obtiene del apéndice F2.

Velocidad:

u = Q/A = (2000/60000)m3/s / 1,682\*10-2 m2 = 1,98 m/s

Re = (1,98\*930\*0,1463) / 0,025 = 10785,5 (**Turbulento**)

Ahora, se calcula el k, factor de rugosidad, con los datos de las tablas de rugosidad (Tabla 8.2) y del apéndice F2:

k = 4,6x10-5 m/ 0,1463 m = 3,14 \* 10-4

Entonces, con estos datos se calcula el f, por Swamee y Jain:

Con este dato, las pérdidas de energía en régimen **turbulento** quedan:

Aplicando la ecuación de energía, para calcular la caída de presión entre dos puntos (uno aguas arriba y otro en la estación de bombeo):

=

Esta es la caída de presión, que se debe solamente a las pérdidas de energía, porque la velocidad es constante y la altura también.

(b). Para la potencia que debe suministrar la bomba, si uno se fija bien en la ecuación: Pa = Donde Por definición de presión manométrica. O si no, se puede mirar desde la ecuación de energía, pero asumiendo que ahora se quiere que las presiones sean iguales, entonces, **ha = hL**

1. Calcule la pérdida de energía conforme pasa agua por 45 m de tubería de cobre tipo K de 4 pulgadas, a razón de 1000 L/min. Hágalo con el diagrama de Moody, por la ecuación de Hazen – Williams y por Swamee y Jain.

**Solución:**

En ambos casos, hay que calcular primero el Reynolds, pero antes se ve en las tablas los datos necesarios (Apéndices A y H): peso específico del agua (9810 N/m3); densidad del agua (1000 kg/m3); viscosidad absoluta del agua (1,02x10-3 Pa\*s); diámetro interno de la tubería (97,97 mm) y área de flujo (7,538x10-3 m2)

Velocidad: Q/A = (1000/60000)m3/s / 7,538x10-3 m2 = 2,2 m/s

Re = (1000\*0,09797\*2,2) / 1,02x10-3 = 212366,3 (**Turbulento**)

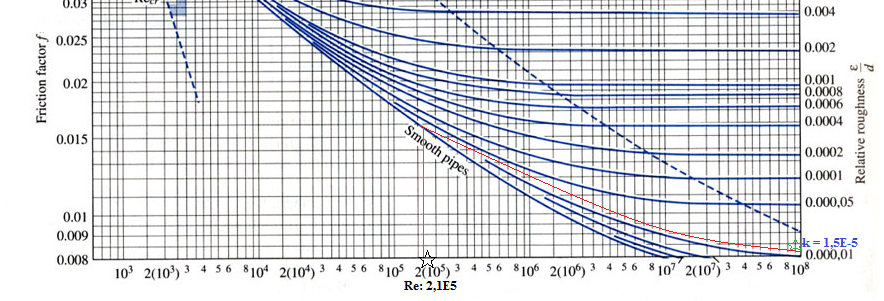
Ahora, el factor de rugosidad: k = /D, donde la RUGOSIDAD se obtiene de la Tabla 8.2 del Mott para tubos de cobre: 1,5\*10-6 m. Entonces,

k = 1,5\*10-6 m / 0,09797 m = 1,53 \* 10-5

Entonces, con estos datos se calcula el ***f***, por Swamee y Jain:

O se mira en el diagrama de Moody, simplificando o redondeando valores de Re y de k, así: Re: 2,1\*105 k: 1,5\*10-5

No va a dar igual, porque a medida que el k es más bajo, no se puede determinar con precisión en el diagrama. Y hay que seguir la curva, no irse recto desde el k. Se va con una curva que tiende a unirse con la línea de tubos lisos (*smooth pipes*), ya que un tubo liso es uno donde el k es demasiado bajo, porque el  es muy bajo o el diámetro es tan grande que no influye la rugosidad. Y se sigue la curva hasta que se encuentre con el Reynolds. Y de ahí, se va a la izquierda, en el eje vertical, y se lee ***f***. (Según el diagrama da casi 0,016)



Con este dato, las pérdidas de energía en régimen **turbulento** quedarían:

Si se reemplaza f por 0,016 el cambio no es significativo: **1,81 m**. Error del 3,7%.

Ahora, finalmente, el cálculo de las pérdidas por la ecuación de **Hazen Williams**. Hay que decir antes, que esta ecuación se usa solamente para conducción de agua, limitada a diámetros de tubería entre 2 pulgadas y 6 pies, a velocidades de flujo no superiores a 10 pies/s y temperatura del agua cercana a 60°F. Con todas estas limitaciones, la ventaja que tiene es su facilidad de uso. Entonces, en los casos afortunados en que se puede usar es mejor recurrir a ella:

Donde: ***u*** velocidad (m/s) coeficiente de Hazen Williams (Tabla 8.3); **R**: radio hidráulico (m), que en este caso se calcula como D/4; **s**: gradiente hidráulico. El gradiente hidráulico es la relación entre las pérdidas de energía sobre la longitud del documento:

Entonces,

Ch para tubo de cobre: 130; R: 0,09797/4 = 0,0245 m

L= 45 m; u = Q/A = 2,2 m/s; despejando hL.

2,41m

Como se ve, la diferencia sería notable con respecto del valor obtenido por la ecuación de Swamee y Jain, pero el cálculo es más rápido, porque no hay que calcular ***f***.

En la Tabla 8.4 se muestran todas las formas de la ecuación de Hazen Williams en unidades de ambos sistemas.

Uso del **nomograma** de Hazen Williams. Para no resolver la ecuación de Hazen Williams (en los casos afortunados), se puede recurrir a una simplificación más: el nomograma.

En la gráfica solo hay que ubicar los puntos y unir por una línea recta. Y leer por donde pase, sea lo que sea que se quiera leer. Para el ejercicio no se puede porque no se tiene el nomograma del cobre, es decir para un *Ch* de 130.